



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**KONSTRUKCE MAGNETICKÉHO SEPARÁTORU
PRÁŠKOVÝCH KOVŮ**

THE CONSTRUCTION OF THE MAGNETIC METAL POWDER SEPARATOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Papaj

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Lukáš Papaj**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Konstrukce magnetického separátoru práškových kovů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při multimateriálovém 3D tisku dochází ke smíchání dvou různých materiálů. Jejich následná separace pro účely recyklace práškových materiálů může být realizována pomocí oddělením frakce na sítích nebo, v případě magnetického a nemagnetického materiálu, pomocí elektromagnetu. Zařízení by mělo být schopné oddělit např. práškový materiál čistého železa a práškový materiál z čisté mědi.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je navrhnout konstrukci zařízení pro separování magnetických a nemagnetických práškových materiálů používaných pro selektivní laserové tavení kovů.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- identifikace parametrů pro návrh zařízení,
- návrh dvou konstrukčních variant,
- zpracování zvolené varianty,
- tvorba výkresové dokumentace.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkres sestavení.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2019.pdf

Seznam doporučené literatury:

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE, Richard G. (Richard Gordon) BUDYNAS, Martin HARTL a Miloš VLK. Konstruování strojních součástí. V Brně: VUTIUM, 2010, xxv, 1159 s. : il. ; 26 cm. ISBN 978-80-214-2629-0.

NESVADBA, Jindřich. Zařízení pro drcení a třídění odpadu: 1. část. Praha: Inkoteka, 1994, 32 s.

ŠNĚDAR, Jan. Magnetický separátor [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2016 [cit. 2018-10-27]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/61031>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá návrhem konstrukce pro recyklaci prášku využitého při vícemateriálovém 3D tisku technologií SLM. Přesněji jde o separaci smíchaných kovových prášků pomocí magnetického separátoru, který je schopen separovat dva prášky se stejnými distribucemi. Na základě poznatků z řešené průmyslových separátorů a úspěšnosti provedeného experimentu byla zvolena metoda separace pomocí magnetického bubnu, na který je rovnoměrně přiváděn prášek pomocí vibrační násypky. V provedeném experimentu bylo zjištěno, že metoda je vhodná pro separaci diamagnetického kovu ale pro kvalitní separaci feromagnetického kovu je nutná úprava rychlosti nasypávání. Dále byla pro tuto konstrukční variantu zpracována výkresová dokumentace, podle které může být separátor sestaven a využit v laboratořích pro separaci prášků.

KLÍČOVÁ SLOVA

magnetický separátor, kovový prášek, recyklace, SLM, více materiálový 3D tisk

ABSTRACT

This thesis deals with the design of construction for recylation metal powder, which is used in multi-material 3D printing with SLM technology. More specifically it is separation of mixed metal powders by magnetic separator, which is capable of separating two powders with the same distributions. Based on knowledge from industrial separators and successful experiment method of separating with magnetic drum was chosen, on which is equally driven metal powder from vibrating feeder. In executed experiment was discovered, that the method is appropriate for separating non-magnetic powder but for high quality separation of magnetic powder must be adjusted speed of feeding. Next was processed drawing documentation for this variant. By this documentation can be separator assembled and used in laboratory for separating metal powders.

KEYWORDS

magnetic separator, metal powder, recycling, SLM, multi-material 3D printing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PAPAJ, Lukáš. Konstrukce magnetického separátoru práškových kovů. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117341>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Davidu Paloušekovi, Ph.D. za poskytnutí odborných rad a ochotu při vedení práce. Dále Ing. Vítu Šreibrovi za pomoc při optickém vyhodnocení experimentu.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením doc. Ing. Davida Palouška, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Selektivní tavení kovů	14
2.2	Separování prášků	14
2.2.1	Přesívání prášků	15
2.2.2	Magnetická separace	16
2.3	Využívané kovové prášky	17
2.3.1	Základní vlastnosti	17
2.4	Magnetické separátory	18
2.4.1	Druhy s automatickým čištěním	18
2.4.2	Laboratorní řešení	21
2.5	Magnety	22
2.5.1	Elektromagnety	22
2.5.2	Permanentní magnety	22
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	24
3.1	Analýza problému	24
3.1.1	Volba metody separace	24
3.1.2	Volba magnetů	25
3.1.3	Dávkování prášku	25
3.2	Cíl práce	25
4	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	26
4.1	Řešení s magnetickým válcem	26
4.1.1	Výhody	27
4.1.2	Nevýhody	27
4.2	Řešení s magnetickým bubnem	28
4.2.1	Výhody	28
4.2.2	Nevýhody	28
4.3	Volba řešení	29
4.3.1	Vyhodnocení separace	29
5	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	31
5.1	Zásobník na smíchaný prášek	32

5.2	Vibrační násypka	32
5.3	Magnetický buben	32
5.3.1	Magnety	33
5.3.2	Buben	34
5.3.3	Uložení bubnu a statické klece	34
5.4	Krytování	37
5.5	Rám	37
6	DISKUZE	38
6.1	Identifikace parametrů	38
6.2	Návrh dvou variant	38
6.3	Výběr zvolené varianty	38
6.4	Prototyp bubnového separátoru	39
6.5	Výkresová dokumentace	39
6.6	Bezpečnost a možné pokračování	39
7	ZÁVĚR	41
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	42
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	45
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	46
11	SEZNAM TABULEK	47
12	SEZNAM PŘÍLOH	48

1 ÚVOD

Při aditivní výrobě kovových součástí technologií selektivního laserového tavení (SLM technologie) je použito více prášku, než je potřeba pro samotnou součást. Po dokončení jednomateriálového tisku je tento přebytečný prášek recyklován a opětovně využit při další výrobě. Pokud se vyrábí součást z více materiálů, dojde ke smíchání těchto prášků a je nutno je od sebe separovat a až poté recyklovat pro opětovné využití.

Cílem práce je vyvinout funkční řešení magnetického separátoru pro separování prášků používaných SLM technologií při vícemateriálovém 3D tisku kovů. Poslední dva roky je velice rozšířen vícemateriálový tisk plastů technologií FDM a vícemateriálový tisk neminul ani oblast SLM tisku. Jedná se zejména o použití čistého feromagnetického železa a čisté mědi.

Řešením je separace smíchaných prášků na základě mechanických, nebo fyzikálních vlastností. Prášky s odlišnou distribucí lze separovat pomocí sít. Při tisku z magnetického železa a jiného nemagnetického materiálu jde s výhodou využít magnetismu.

Novým trendem v aditivní výrobě je vícemateriálová výroba součástí. Při soutisku více materiálů dojde ke smíchání obou prášků, a proto je žádoucí tyto prášky separovat a opětovně využít při dalším tisku. Tímto se sníží náklady na tisk zejména drahých materiálů, jako je titan.



Obr. 1 Prášky pro SLM tisk [32]

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

S technologií tisku selective laser melting (SLM), nebo dříve selective laser sintering (SLS) se začalo experimentovat již v roce 1981, ale dostatečně zdokonalena byla až v roce 1991 [1]. Vícemateriálový tisk se vyvíjí zhruba posledních 6 let. Díky jeho nízké rozšířenosti se na trhu neobjevuje mnoho řešení pro separaci použitých prášků.

Běžně se použitý materiál přesívá přes síta, aby mohl být použit opět pro další tisk. V tomto případě jde zejména o odstranění částí spalín, které mají větší rozměr. Ing. Jan Sůkal [2] ve své diplomové práci ukázal, že tento recyklovaný materiál má velice podobnou distribuci, jako nový materiál. Při tomto procesu dochází pouze k recyklaci jednoho materiálu o stejné frakci. Ale na základě této metody by mohlo být možné separovat i dva materiály s odlišnými distribucemi.

2.1 Selektivní tavení kovů

3D tisk touto metodou spočívá v nanášení tenké vrstvy kovového prášku o velikosti zhruba 20-100 μm a následném natavení vrstvy pomocí laseru v místech, kde se bude nacházet tisknutý objekt. Tloušťka nanesené vrstvy a distribuce částic prášku je klíčová pro kvalitu vnitřní struktury tisknutého objektu.

S příchodem této technologie se vývoj mnoha oblastí výzkumu posunul dopředu, protože tato metoda dovoluje výrobu téměř jakéhokoliv objektu nebo struktury struktury, za využití pouze nezbytně nutného materiálu. Technologie SLM se dále posunula dopředu díky možnosti soutisku více materiálů. Nejen soutisk po jednotlivých vrstvách, ale také v rámci jedné vrstvy. Tímto jde kombinovat klady více materiálů na jedné součásti.

2.2 Separování prášků

Separaci je možno provést na základě distribuce prášku, nebo magnetických vlastností [3]. Případně by bylo možno využít i jiných vlastností, jako je hustota nebo sypný úhel. Konstrukce takového separátoru by byla již značně komplikovaná a nejdříve by byl nutný důkladný výzkum těchto parametrů.

2.2.1 Přesívání prášků

Využívané prášky jsou charakterizovány distribucí velikosti částic. Touto vlastností je dáno, mezi jakými hodnotami se pohybují velikosti částic. Na základě dodržení dané distribuce může být materiál přesíván.

Separaci přesíváním se zabývá například firma ELCAN Industries [4], která má v nabídce jak průmyslové přesívací stroje, tak laboratorní separátory pro přesívání jemných kovových prášků pro 3D tisk. Pro separaci prášků firma doporučuje 3 své řešení.

- **Hi-Sifter** [5] – Tento vibrační přesívací stroj je jejich nejjednodušší řešení. Vyrábí jej ve velikostech sít od 400-1000 mm, přičemž nejmenší 400 mm variantu doporučují pro laboratorní účely. Separátor je poháněn silnými vertikálními vibracemi, které usnadňují propadávání menší frakce a zároveň zabraňují ucpávání. Jedná se o jednosítový separátor, takže jeho primární využití bude zejména recyklace použitého prášku při jedno materiálovém tisku.
- **Hi-Sifter Powder Reclaiming System** [6] – Toto řešení je značně profesionálnější a je primárně určeno pro separaci jemných prášků využívaných při aditivní výrobě, v letectví, nebo v biomedicíně. Výrobce slibuje separaci až do 44 μm . Separátor je zcela uzavřen s možností odsání vzduchu a vytvoření vakua, aby nemohlo dojít k explozi. Případně je možno separátor napustit inertním plynem, který chemicky nereaguje s prášky, které mohou být náchylné například k oxidaci s kyslíkem.
- **Rhewum** [7] – Jedná se o největší separátor, díky tomu, že je vícesítový dokáže separovat více distribucí najednou. Pro laboratorní účely není moc vhodný, protože jej vyrábí ve velikostech sít od 1,4 m^2 do 24,3 m^2 . Princip vícestupňové separace je zajímavý, ale vhodný pro jiné aplikace.



Obr. 2 Sítový separátor Hi-Sifter Powder Reclaiming System [6]

Podobné separátory nabízí také americká firma Kenutec [8], která má navíc ve své nabídce také rotační síta, která jsou určena pro větší objemy prášků.

Například firma SLM-Solutions Group AG [9] udává ve svých materiálových listech distribuci prášku, která může být u slitiny CuSn10 20-63 μm [10]. U feromagnetické martenzitické nerezové oceli 1.4545 je distribuce 10-45 μm [11]. Jak je vidět, tyto dva prášky se svou distribucí silně překrývají, tudíž by jejich separace přesíváním nebyla vhodná.

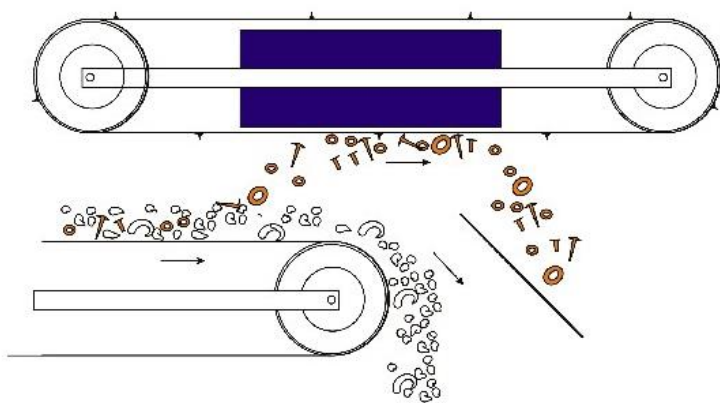
Pro dosažení co nejkvalitnějšího tisku je nutné zvolit velice blízké distribuce obou prášků. Z tohoto důvodu tato metoda separace není zrovna nejvhodnější. Další limitací přesívání bude velikost ok sít, které není možné zmenšovat do jednotek μm .

2.2.2 Magnetická separace

Dalším možným způsobem je separace na základě magnetických vlastností jednotlivých prášků. Jedinou podmínkou je, aby pouze jeden materiál byl feromagnetický a mohl být pomocí magnetů odlučován mimo diamagnetický materiál.

Tuto separaci doporučuje S. L. Sing [3]. Jie Chen [12] touto metodou separoval prášky po svém pokusu s tiskem oceli 316L a slitiny mědi CuSn10, na vlastním magnetickém separátoru. Toto je podstatná informace o tomto problému, protože se s tímto problémem setkali i ostatní.

Výhoda a podstata této metody spočívá v možnosti separace dvou prášků o stejných distribucích, což je pro tuto aplikaci vyžadováno. Další výhodou je relativně jednoduchý princip separace a jednoduchost konstrukce, kterou nebude problém přizpůsobit do laboratorních podmínek.



Obr. 3 Deskový magnetický separátor s kontinuálním čištěním [33]

2.3 Využívané kovové prášky

Nejrozšířenější jsou prášky ocelové, např. německá firma SLM-Solutions Group AG [9] má ve své nabídce 6 ocelových prášků, jedná se zejména o austenitické nerezové oceli a nástrojové oceli. Dále nabízí prášky slitin niklu, kobaltu, titanu, hliníku a mědi [9]. Jde vidět, že se využívá zejména „jakostnějších“ ocelí a materiálů, které nejsou zcela běžné a také nejsou nejlevnější. Proto je jejich maximální využití zcela podstatné.

2.3.1 Základní vlastnosti

Mezi základní vlastnosti prášků patří velikost zrn, tvar zrn, distribuce velikosti částic, mikrostruktura a měrný povrch částic [13]. Z pohledu této bakalářské práce jsou zajímavé zejména velikost a částečně tvar zrn. Dá se předpokládat, že z tohoto pohledu je tvar zrn téměř zanedbatelný, protože nebudu řešit dokonale uspořádanou tenkou vrstvičku, která je podstatná při samotném tisku.

Jeden z dodavatelů prášků SLM-Solutions Group AG [9] u ocelí uvádí distribuci 10-45 μm a sférický tvar částic. U cínového bronzu – slitiny CuSn10 udává velikost částic 20-63 μm , taktéž sférického tvaru [9]. Jak je vidět, frakce většiny materiálů jsou si velice podobné, proto nebude nutno zohledňovat, jaké materiály jsou separovány.

Prášky se dále popisují technologickými vlastnostmi, mezi které patří například sypná hustota, tekutost, objem po setřesení a další zejména statické a dynamické chování prášků [13]. Tyto vlastnosti se měří pomocí speciálních a certifikovaných zařízení. Měření tekutosti a sypné hustoty probíhá pomocí Hallovy nálevky [14]. Tyto vlastnosti jsou důležité zejména pro odhad objemového průtoku separátorem.

Vlastnost	Ocel	Měď
Sypná hustota ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	2,30	2,34
Setřesná hustota ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	3,75	3,24
Tekutost ($\text{s}\cdot(50\text{g})^{-1}$)	38,45	21,50

Tab. 1 Technologické vlastnosti ocelových a měděných prášků [15], [16]

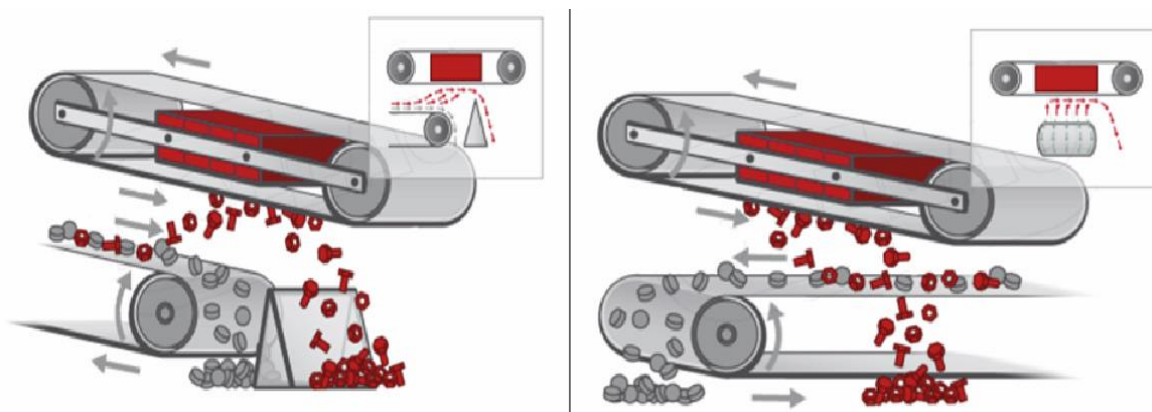
2.4 Magnetické separátory

Magnetické separátory jsou obecně využívány pro odlučování feromagnetických částic ze směsí, kde nejsou žádány, tedy nejčastěji při třídění odpadů nebo směsí. Při separaci může nastat, že většina smíšeného prášku bude feromagnetická, proto je nutné použít takový magnetický separátor, který odvádí prášek kontinuálně, tedy separátor s automatickým čištěním [17]. Ale také jsou statické separátory, které mají funkci jakéhosi bezpečnostního prvku, například pokud se nedopatřením dostane kov do mouky.

2.4.1 Magnetické separátory s automatickým čištěním

Pro separátor kovových prášků bude nejvhodnější využít pásový dopravník s magnetickou deskou, nebo hnaný magnetický válec, případně magnetický buben [17]. Tyto tři varianty jsou specifické kontinuálním odvodem feromagnetického materiálu. Tyto druhy separátorů jsou zcela typické a dodává je každá firma, která se zabývá magnetickou separací materiálů, například firmy: Sollau [17], Magnet-PRO [18], MaGsy [19].

Magnetická deska: je umístěna těsně nad pásem, aby bylo zajištěno co nejintenzivnější magnetické pole, které je vyvoláno nejčastěji permanentními magnety. Využívají se zejména feritové magnety, jejichž výhodou jsou především nízké pořizovací náklady, pro kvalitnější separaci se využívají neodymové magnety, případně elektromagnety. Typické umístění je rovnoběžně, nebo kolmo nad dopravníkem [20].

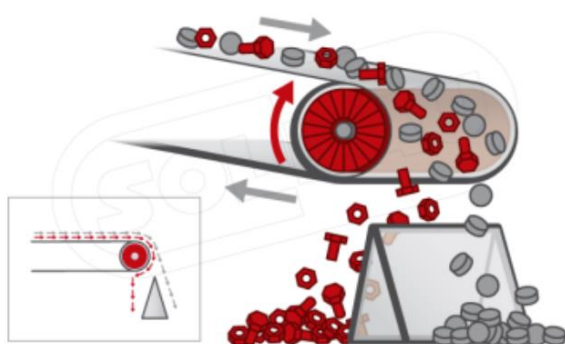


Obr. 4 Magnetická deska rovnoběžně s dopravníkem (vlevo); kolmo (vpravo) [17]

Obě uspořádání mají své výhody. Při rovnoběžném umístění je možné použít slabší, tedy levnější magnet [20]. Při natočení magnetické desky o 90° vůči dopravníku může být výhoda vhodnější zástavby do separační linky – separátor může být kdekoliv nad dopravníkem.

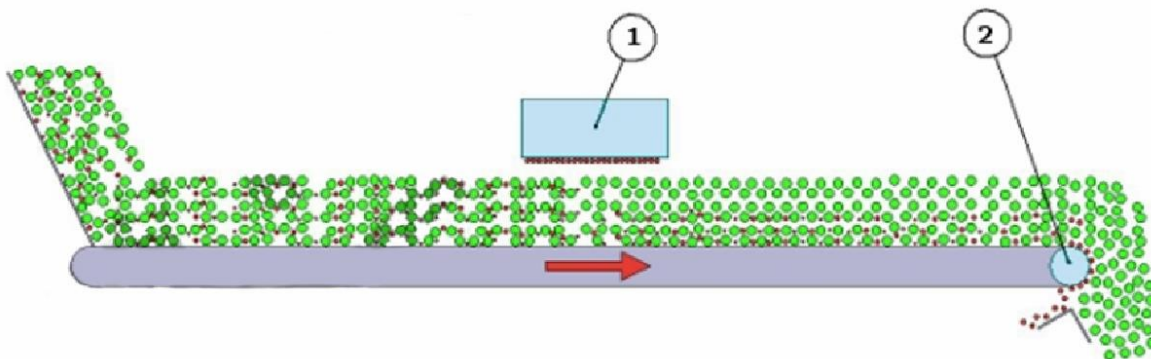
Použití magnetické desky pro separátor prášků je vhodné, protože na dopravníku bude nasypána určitá vrstva prášku a tento typ separátoru by lehce odseparoval vrchní část prášku. Pro maximální účinnost bych volil výhradně rovnoběžné uspořádání. Nevýhodou je nutnost použít další dopravník, který bude odvádět feromagnetický kov. Toto uspořádání povede na složitější konstrukci separátoru, čímž vzniknou větší náklady na jeho výrobu.

Magnetický válec: nejčastěji bývá nedílnou součástí pásového dopravníku, hnaným bubnem [21]. Tudíž jeho zástavba nevyžaduje žádné konstrukční zásahy. Jednoduchý a bezúdržbový chod bývá zajištěn permanentními magnety, které jsou dostačující. Pro zachytávání drobných feromagnetických částecek je doporučeno osazení extrémně silnými neodymovými magnety, které vynáší feromagnetický kov až za osu válce [21].



Obr. 5 Magnetický válec [18]

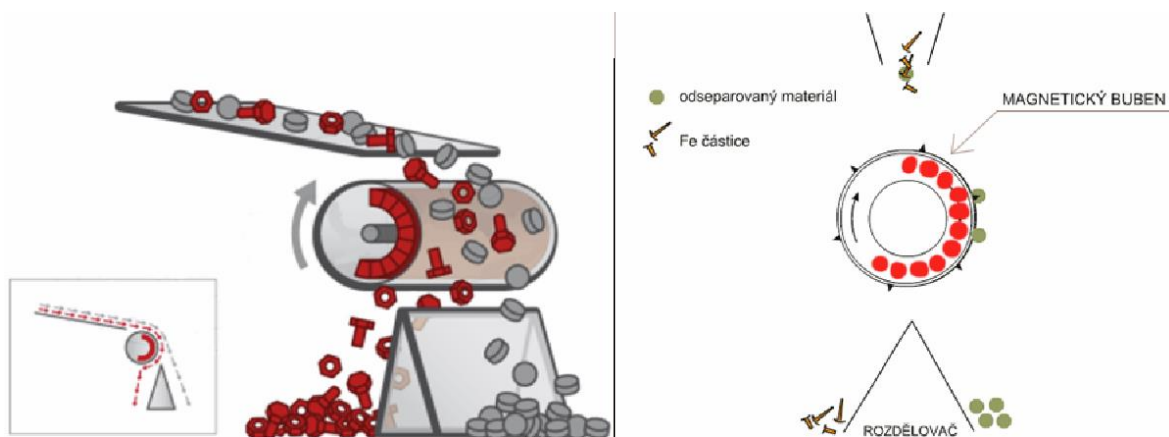
Při vytvoření dostatečně tenké vrstvičky prášku na dopravníku, by buben měl být schopen přitáhnout veškerý feromagnetický materiál, a tudíž by měl být magnetický válec dostačující pro separaci smíšených prášků. Pokud se nepovede vytvořit dostatečně tenkou vrstvu, nebo směs na dopravníku bude natolik hutná, že magnety nedokáží přitáhnout veškeré feromagnetické částecčky, je doporučeno kombinovat magnetický válec na dopravníku směsi a dopravník s magnetickou deskou [22].



Obr. 6 Kombinace magnetické desky (1) a magnetického válce (2) [19]

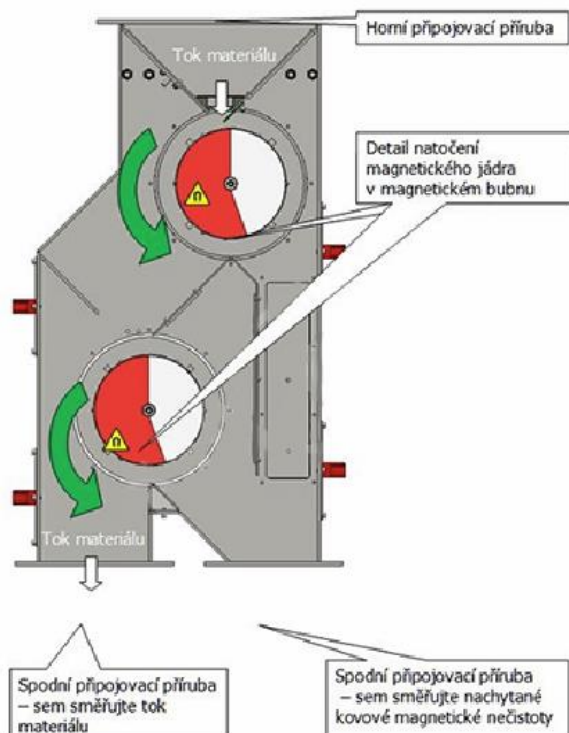
Použití samotného magnetického válce by bylo konstrukčně velice jednoduché a také nejspíš dostačující. Kombinace obou metod separace by měla být velice efektivní, nicméně je nutné použít druhý dopravník, který zkomplikuje konstrukci.

Magnetický buben: tvoří samostatnou část, která je umístěna hned pod násypkou, nebo pod koncem dopravníku [23]. V rotačním bubnu jsou staticky umístěny permanentní magnety, ve tvaru půlměsíce [23], díky kterým feromagnetický kov odpadá až za osou válce, čímž je separován od diamagnetického kovu.



Obr. 7 Magnetický buben pod dopravníkem [23] (vlevo), pod násypkou [24] (vpravo)

Pro zvýšení efektivity separace magnetického bubnu je možné jej zakrytovat do skříně, ve které může být použit víckrát. Tím vznikne vícestupňová separace v relativně malém prostoru [24].



Obr. 8 Dvoupátrový magnetický buben [24]

Primární výhodou bubnů je to, že na ně separovaný materiál dopadá, čímž se provzdušňuje a je kvalitněji separován. Nejsou tedy náchylné na tlustší vrstvu směsi, jako je tomu u magnetického válce. Při využití tohoto řešení by nebylo nutno konstruovat žádný dopravní pás, proto je tato varianta taktéž zajímavá. Na experimentálním separátoru bych rád otestoval funkčnost samotného magnetického bubnu a na základě tohoto experimentu navrhl finální řešení. Protože není podmínkou rozseparovat všechnen materiál během krátké doby, není problém prášek separovat dvakrát, či víckrát po sobě, aby zůstal minimálně kontaminován.

2.4.2 Laboratorní řešení

Česká firma Sollau [25] má ve své nabídce laboratorní magnetický separátor LSV, který je zmenšeninou magnetického válce, osazenou extra silnými neodymovými magnety, které dokáží separovat i velmi malé částice – až 30 μm . Pro dosažení tak silného magnetického pole je využit velmi tenký, ale odolný dopravníkový pás vyrobený z kevlaru, nebo skloteflonu. Separovaný materiál je rozvolňován pomocí regulovatelného vibračního podavače na dopravníkový pás [25].

neodymové magnety v tomto separátoru jsou schopny dosáhnout magnetické indukce až 2,1 T [25]. Výrobce nicméně upozorňuje, že maximální velikost magnetického pole není nejdůležitější pro separaci malých částic. Mnohem důležitější je hustota magnetických pólů. Při velkých vzdálenostech magnetických pólů, a tedy dosažení maximální magnetické indukce by byl separátor nepoužitelný pro separaci malých částic, protože by proklouzávaly mezi vzdálenými póly. Proto firma Sollau doporučuje optimální magnetickou indukci na povrchu válce 1,1 T, pro co nejlepší zachytávání i těch nejmenších částic [25].



Obr. 9 Laboratorní separátor firmy Sollau [25]

Laboratorní separátor doporučují pro využití v různých průmyslových aplikacích, ale separaci prášků pro aditivní výrobu nezmiňují. Pouze jedna firma nabízí laboratorní řešení separátoru, ostatní separátory jsou pouze velké, průmyslové. V tuto chvíli je velice málo zkušeností se separací jemných kovových prášků. Proto bude v této oblasti spousta prostoru pro vývoj.

2.5 Magnety

V magnetických válcích a bubnech se využívají zejména permanentní magnety. Buď feritové, nebo pro kvalitnější separaci drobných částic silnější neodymové (NdFeB). Elektromagnety se využívají jen ve výjimečných případech a zejména jako deskové separátory, protože neodymové magnety dosahují dostatečné magnetické indukce. V bubnových separátorech využívá elektromagnety například firma Walker magnetics, která vyrábí bubny od průměru cca 800 mm, které jsou určeny pro těžký průmysl [26].

2.5.1 Elektromagnety

Elektromagnety mohou dosahovat velké magnetické indukce, která je důležitá pro oddělování feromagnetického kovu, zejména, pokud se jedná o malé částčky. Magnetické pole musí být vyvoláváno kolmo na plochu válce nebo bubnu. To vyžaduje více segmentových elektromagnetů, což značně komplikuje konstrukci. Proto se dnes využívají elektromagnety pouze ve velkých separátorech, kde není nutno brát ohled na potřebné místo.

U separačních bubnů se elektromagnety využívají pro separaci hrubozrnného materiálu [27]. Proto je nevhodné využít elektromagnety pro separování jemného prášku. Nevýhodou je také energetická náročnost.

2.5.2 Permanentní magnety

Na trhu jsou dostupné permanentní magnety s velkou magnetickou indukcí, jedná se o magnety z alkalických zemin – neodymové magnety (NdFeB). Tyto magnety dosahují magnetické indukce až 1,4 T [28], takže jsou schopny v určitých případech nahradit elektromagnety. Permanentní magnety jsou doporučeny pro separaci drobných částček [27] [25]. Výhodou je, že permanentní magnet nemusí být elektricky napájen, toto výrazně snižuje energetickou náročnost celého separátoru a přispívá k jeho bezúdržbovosti.

Neodymové magnety se vyrábí v různých tvarech a rozměrech, navíc je možné si nechat vyrobit i vlastní tvary na zakázku [29]. Z běžně dostupných magnetů bych volil segmentové magnety, které by přímo kopírovaly tvar válce, nebo magnety tvaru kvádru. Pro maximální účinnost separace je nutné, aby póly magnetů směřovaly kolmo k ploše válce nebo bubnu. U segmentových magnetů je nutno mít polovinu magnetů orientovanu obráceně.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Při soutisku více materiálů pomocí technologie SLM dochází ke smíšení všech použitých, ale pro výrobek nevyužitých prášků. Pro tisk je vhodné využívat velice podobné distribuce jednotlivých prášků, aby jednotlivé vrstvy byly stejně tlusté a prášek byl nanesen v co nejvyšší hustotě, pro dosažení co nejkvalitnější mikrostruktury tištěného objektu.

Po dokončení jedno materiálového tisku je běžnou praktikou prášek recyklovat, aby mohl být opětovně využit při dalším tisku. Recyklace probíhá přesíváním, kdy se odlučují z prášku nečistoty ve formě spalin, oxidů a velkých částic. U vícemateriálového tisku tento druh separace není možno provést přímo. Nejprve je nutno prášek separovat a poté je teprve možno jej recyklovat na sítěch. Tato separace může být provedena různými metodami, které jsou založeny na odlišných principech.

3.1.1 Volba metody separace

Jednou z běžně praktikovaných metod separace prášků je jejich prosívání přes síta. Tato metoda je založena na rozdílu distribucí jednotlivých prášků. Výhodou je jednoduchá konstrukce, která spočívá ve využití pouze vibračního síta. Ale tato metoda není příliš vhodná, už jen z toho důvodu, že distribuce jednotlivých prášků se zpravidla částečně překrývají. Pro dosažení kvalitního tisku je nezbytné využít velice podobné distribuce, z tohoto hlediska je tato metoda nevyužitelná. Byla by vhodná pro jinou aplikaci.

Dalším problémem by byla nemožnost separace malých frakcí. Skotnicová [13] uvádí způsoby analýzy velikosti částic, kde je síťová analýza doporučena u částic v rozmezí 50-500 μm . Z tohoto důvodu by nemuselo být nemožné pomocí sít separovat prášky s menších frakcí.

Další možností je využití magnetických vlastností obou prosívaných prášků. Respektive využití toho, že právě jeden prášek je feromagnetický. Předpokládá se nutnost separovat většího množství směsi, proto je nejvhodnější užít separátor s kontinuálním čištěním. Na základě zjištěných informací bych s ohledem na jednoduchost využil magnetický válec, nebo magnetický buben pro samotnou separaci. Pro tuto metodu nastává problém s volbou magnetů.

3.1.2 Volba magnetů

Za účelem magnetické separace se nejběžněji využívají permanentní magnety, které jsou pro většinu aplikací dostačující. Elektromagnety by zkomplikovaly konstrukci, válec nebo buben by musel být osazen segmentovými elektromagnety, které by se obtížně zakomponovaly do malého bubnu. Další nevýhodou je jejich energetická náročnost. Proto bych volil mezi permanentními magnety. S ohledem na to, že malé částice se separují obtížněji, jednoznačně volím neodymové permanentní magnety, které jsou silnější než feritové.

3.1.3 Dávkování prášku

Pro dosažení kvalitního rozseparování je nutné dávkovat prášek v tenké vrstvě, aby diamagnetické částice nebránily feromagnetickým v separaci. Nasypávání prášku na dopravník, případně na magnetický buben budu realizovat pomocí vibračního dopravníku, kterým půjde také jednoduše regulovat rychlost nasypávání.

3.2 Cíl práce

Hlavním cílem je navrhnout konstrukci zařízení pro separování magnetických a nemagnetických práškových materiálů používaných pro selektivní laserové tavení kovů.

Dílčí cíle bakalářské práce:

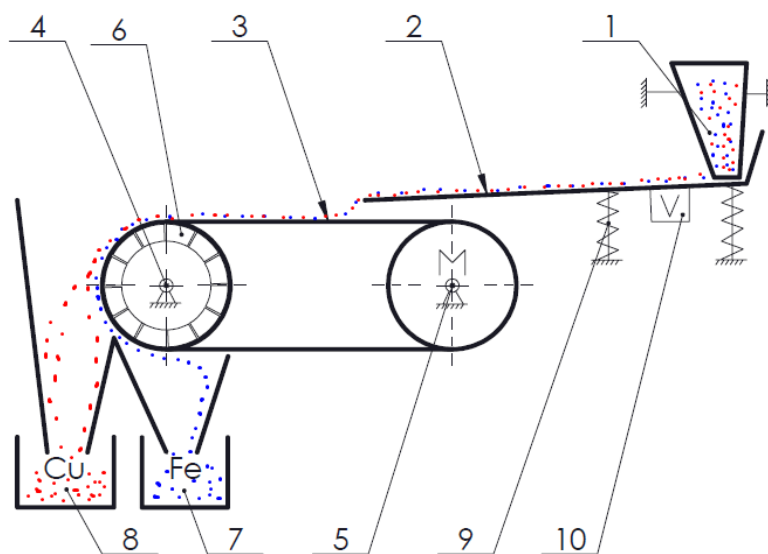
- identifikace parametrů pro návrh zařízení,
- návrh dvou konstrukčních variant,
- zpracování zvolené varianty,
- tvorba výkresové dokumentace.

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

Na základě zjištěných informací volím metodu separace pomocí magnetického bubnu a metodu separace pomocí dopravníku s magnetickým válcem. V obou případech budou použity permanentní neodymové magnety a prášek bude nasypáván pomocí vibrační násypky.

4.1 Řešení s magnetickým válcem

Magnetický válec je součástí dopravníku, nejčastěji jako hnaný válec, ale může být i hnací. Pomocí vibrační násypky bude na dopravníkový pás nasypávána tenká vrstva prášku. Diamagnetický prášek bude vlivem gravitace padat hned za magnetickým válcem, přičemž feromagnetický prášek bude přitahován k dopravníkovému pásu a bude od něj odpadávat až za válcem, kde bude magnetické pole již slabé.



Obr. 10 Řešení s magnetickým válcem

- | | |
|---------------------------------|-------------------------------------|
| 1 – Zásobník na smíchaný prášek | 6 – Neodymové magnety |
| 2 – Vibrační dopravník | 7 – Zásobník pro feromagnetický kov |
| 3 – Pásový dopravník | 8 – Zásobník pro diamagnetický kov |
| 4 – Hnaný magnetický válec | 9 – Uložení vibračního dopravníku |
| 5 – Hnací válec | 10 – Budič vertikálních vibrací |

4.1.1 Výhody

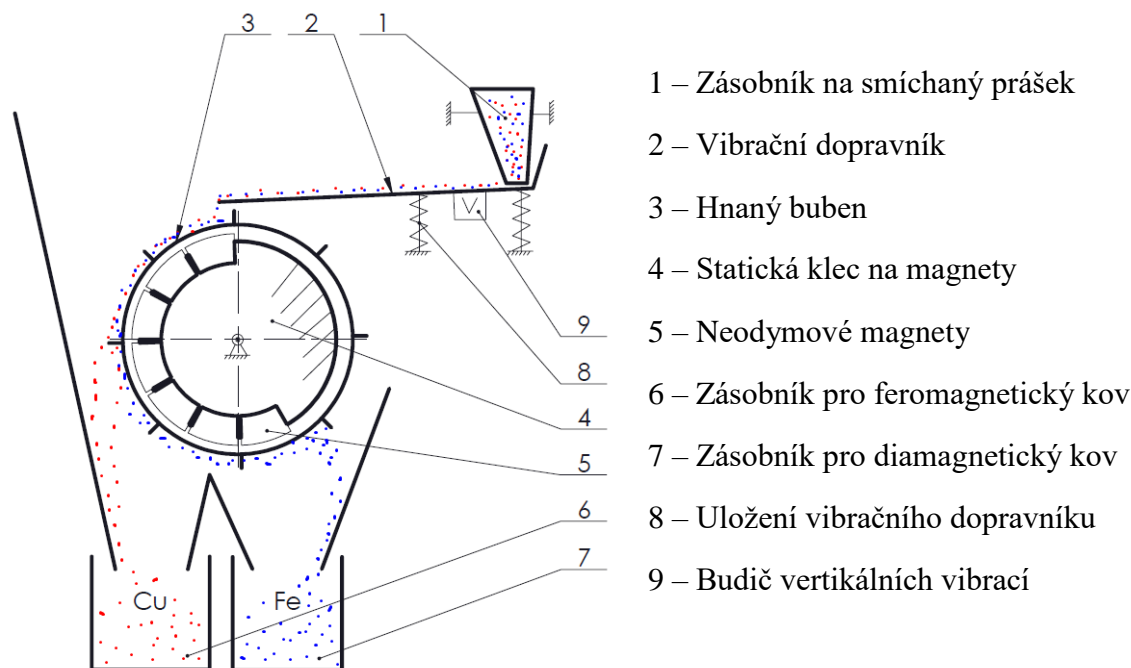
Výhodou této konstrukce je relativně jednoduchý magnetický válec, který se skládá z magnetů. Magnety mohou být po celé šířce a jen skládány jako segmenty válce, nebo může být použito více kratších magnetů u kterých je důležité střídat polaritu. Konstrukci velice zjednoduší, že magnety v magnetickém válci mohou rotovat spolu s tělem válce. Díky tomu není třeba zásadně měnit stávající konstrukce magnetických separátorů.

4.1.2 Nevýhody

Primární nevýhodou této konstrukce je velké množství konstrukčních uzlů, respektive dopravníkový pás, který je primárně určen na přepravu velkého množství materiálu, což laboratorní podmínky nevyžadují. Dále by musel být použit speciální dopravníkový pás, který by byl jednak tenký, aby nezvětšoval vzdálenost částic prášku od magnetů, ale také bez pórů, aby nedošlo k jeho kontaminaci malými částicemi prášku. Toto vede také na složitější údržbu, respektive obtížné čištění celého separátoru. Krytování proti poletujícím částicím prášku by bylo také obtížné.

4.2 Řešení s magnetickým bubnem

Malé množství prášku z vibračního dopravníku dopadá přímo na magnetický buben. V polovině bubnu se nachází staticky uložené magnety, které přitahují feromagnetické částice a uvolňují je až za osou bubnu, přičemž diamagnetické částice odpadávají před bubnem. Aby se docílilo odtržení feromagnetických částic od bubnu, na bubnu musí být zarážky, které dostanou částice mimo magnetické pole.



Obr. 11 Řešení s magnetickým bubnem

4.2.1 Výhody

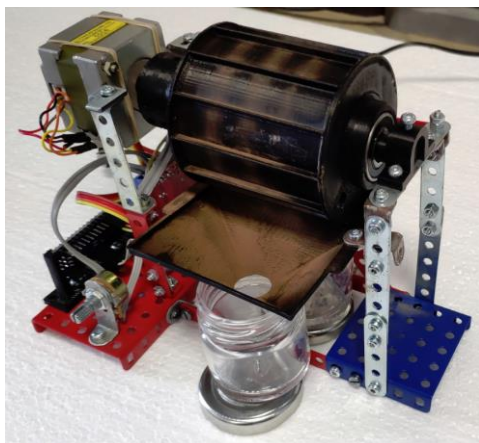
Primární výhodou tohoto řešení je jeho jednoduchost, celá separace probíhá pouze na magnetickém bubnu, na který se postupně nasypává prášek určený k separaci. Není nutné využívat dopravníkové pásy. V případě potřeby je kontaminovaný buben možno jednoduše vyčistit. Taktéž krytování bubnu je velice jednoduché. Díky separaci pouze na magnetickém bubnu je možné jednoduše zakomponovat druhý separační stupeň, který by byl umístěn místo zásobníků na prášek.

4.2.2 Nevýhody

Magnety v bubnu musí být uloženy staticky, přičemž buben se musí otáčet. To vyžaduje komplikovanější konstrukci bubnu, než tomu je v případě magnetického válce.

4.3 Volba řešení

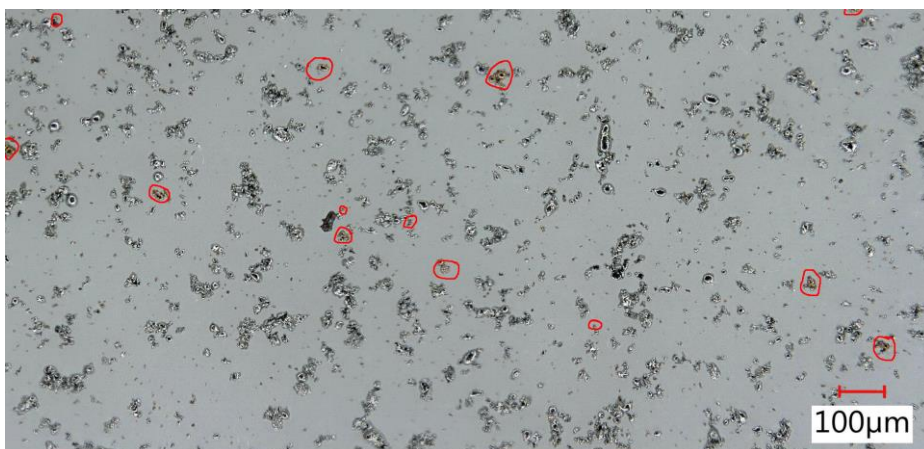
S ohledem na jednoduchost a kompaktnost laboratorního separátoru jsem zvolil variantu separování pomocí magnetického bubnu. Separátor je kompaktní, jednoduše zakrytovatelný a bude možno jej do budoucna rozšířit o další separační stupeň, pokud to bude nutné. Pro ověření vhodnosti tohoto řešení jsem vyrobil experimentální bubnový separátor s neodymovými magnety a na něm otestoval funkčnost této metody separace a opticky vyhodnotil kvalitu separace. V experimentu jsem separoval zhruba 20 g smíchaného železného a měděného prášku.



Obr. 12 Prototyp bubnového separátoru

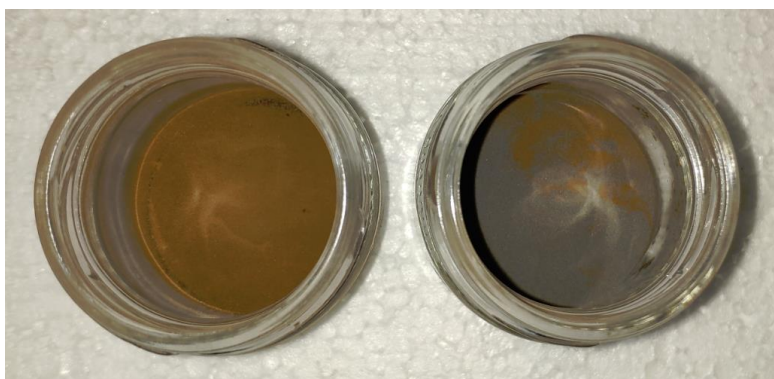
4.3.1 Vyhodnocení separace

Separovaný prášek jsem vyhodnocoval pomocí optického mikroskopu VHX-6000, na kterém byla použita optika VH-Z250R. Na snímcích pořízených mikroskopem je vidět, že v železném prášku (Obr. 13) zůstaly měděné částice. Nebyly rovnoměrně rozloženy, v jednom vzorku bylo zhruba 1,6 % měděných částic a ve druhém vzorku 8,3 % částic mědi.



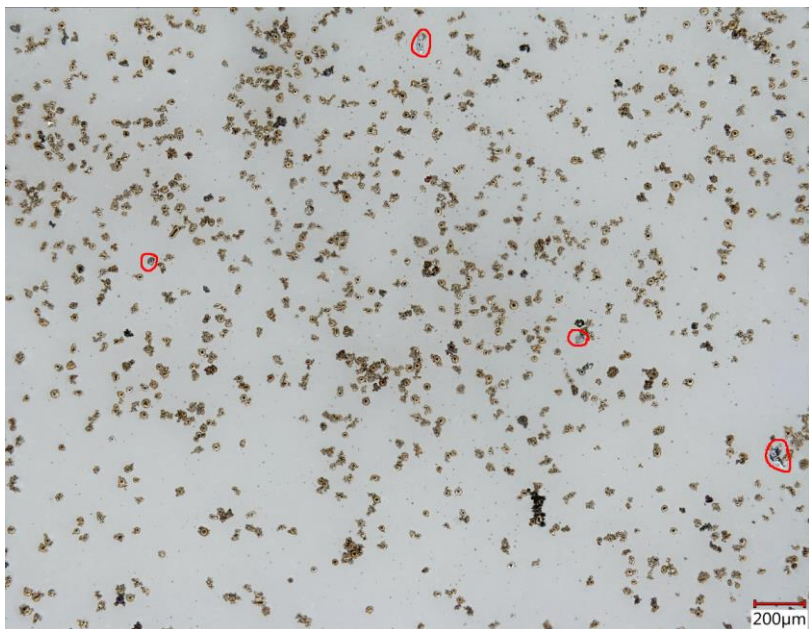
Obr. 13 Cu částice v železném prášku

Po skončení experimentu bylo ve sběrné nádobě pro železo patrná přítomnost měděných částic (Obr. 14). Usuzuji, že toto není chyba použité metody, ale nevhodné konstrukce. V prototypu byly magnety umístěny pouze po osu bubnu. Pokud budou magnety umístěny i dále za osu a celá konstrukce bude přesnější, kvalita separace se může značně zlepšit. Také smíchaný prášek bude nasypáván rovnoměrně, což přispěje ke kvalitě separace. Při úpravě rychlosti nasypávání a rychlosti rotace bubnu může být dosaženo značně lepších výsledků.



Obr. 14 Sběrné nádoby po skončení experimentu; vlevo měď, vpravo železo

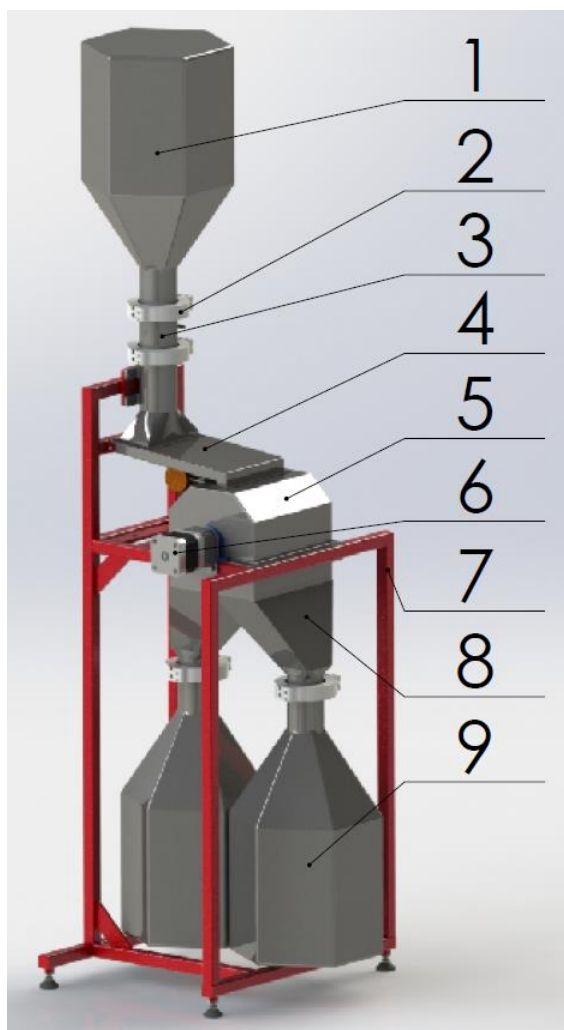
Vyhodnocení měděného prášku vyšlo velice příznivě. Odseparovaný měděný prášek neobsahoval téměř žádné částice železa, jak je vidět na Obr. 15, ale nachází se v něm nečistoty, spaliny a nemagnetické oxidy, které je možno odseparovat na síťovém separátoru pro běžnou recyklaci použitého prášku.



Obr. 15 Fe částice v měděném prášku

5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Na základě úspěšného experimentu bude konečným řešením separátor s magnetickým bubnem. Smíchaný prášek bude nasypáván na buben pomocí vibrační násypky, u které bude jednoduchou změnou budící frekvence možno regulovat rychlost dávkování prášku na buben. V bubnu bude staticky uložena klec osazena kvádrovými neodymovými magnety, okolo které bude rotovat plastový buben. Všechna místa, která budou ve styku s práškem budou krytována, aby se minimalizovala kontaminace ovzduší v blízkosti separátoru. Výkres sestavy viz. Příloha 1.



- 1 – Zásobník na smíchaný prášek s přírubou KF40
- 2 – Přírubová spojka KF40
- 3 – Uzavíratelná klapka s přírubou KF40
- 4 – Vibrační násypka
- 5 – Horní část krytování bubnu
- 6 – Pohon bubnu
- 7 – Rám separátoru
- 8 – Spodní část krytování bubnu včetně přírub KF40
- 9 – Zásobníky pro separovaný materiál

Obr. 16 Render konstrukce separátoru

5.1 Zásobník na smíchaný prášek

S práškem, smíchaným nebo novým, se nejběžněji manipuluje v nerezových uzavřených nádobách, které jsou opatřeny uzavíratelnou klapkou a přírubou pro lehkou montáž do SLM tiskárny, případně jiných strojů. Osazovat separátor mezizásobníkem je poněkud zbytečné, proto vstup pro smíchaný prášek bude opatřen stejnou přírubou, jako je na přenosných nádobách a bude zajištěn příslušnou přírubovou spojkou. Přenosná nádoba musí být osazena klapkou, aby bylo možné ji otevřít, až bude přimontována k separátoru. Prášek bude dopadat přímo na vibrační násypku, která bude dopravovat prášek přímo na buben.

5.2 Vibrační násypka

Násypka bude přepravovat velice jemný prášek, který díky vibračním může vzlétnout do ovzduší, proto volím zakrytovanou násypku, aby se toto riziko co nejvíce minimalizovalo. Utěsnění mezi vibrující násypkou a ostatním krytováním bude zajištěno pryžovou manžetou.

Uložení násypky musí být volné, tedy v měkkých silentblocích nebo pružinách, aby vibrační excentrický budič dokázal celou násypku rozvibrovat. Pro zajištění pohybu částic dopředu, bez ohledu na budicí frekvenci, bude násypka nakloněna.

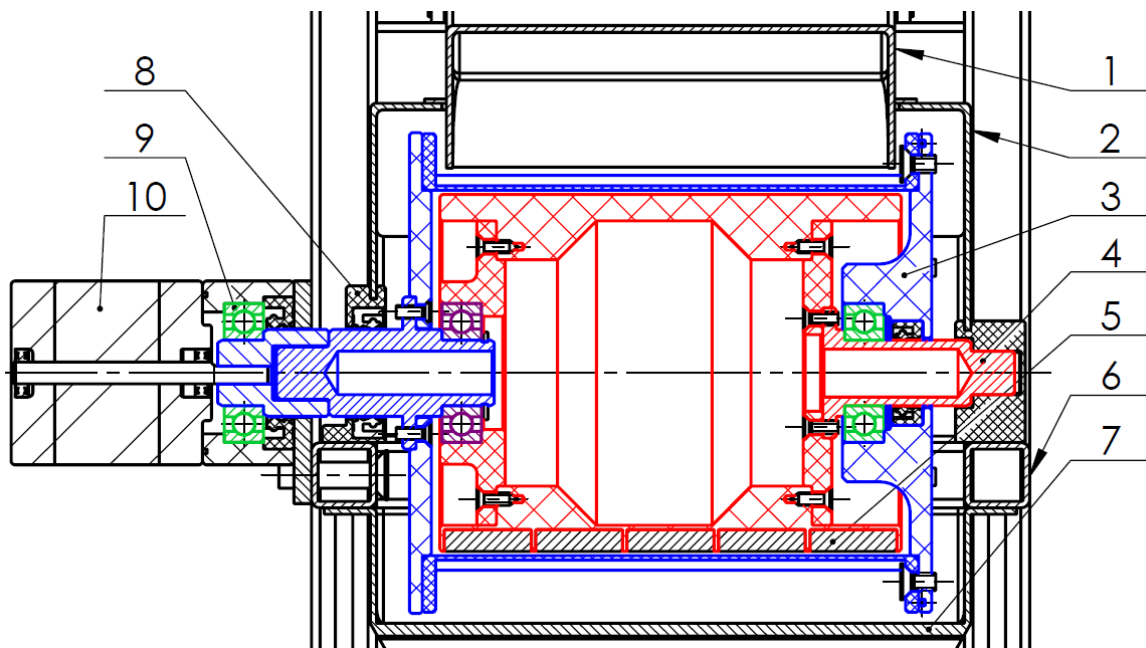
Materiál by měl být diamagnetický a odolný vůči přepravovaným práškům. Povrch by měl být co nejhladší a bez povrchových pórů, aby na něm neulpíval prášek. S ohledem na tyto vlastnosti bych zvolil násypku z nerezové oceli, její výhoda bude v jednoduché výrobě a jednoduché údržbě – čištění při změně separovaných prášků. Alternativní možností by mohla být násypka vytištěná z plastu, například ABS, případně fotopolymeru, a následně povrchově upravená pro vyplnění nerovností a pórů.

5.3 Magnetický buben

Nejdůležitější částí celého separátoru je právě magnetický buben, na kterém celá separace probíhá. Jedná se o laboratorní zařízení, u kterého není vyžadována vysoká produktivita. Proto celý separátor bude menší a kompaktní a bude pracovat při nízkých otáčkách. Předpokládám otáčky bubnu $n = 30 \text{ min}^{-1}$.

Celý buben bude zatížen téměř zanedbatelně, proto si mohu dovolit součásti navrhovat z 3D tištěného ABS plastu. Pro snadnější tisk je zejména klec pro magnety rozdělena na více částí, které se při montáži slepí lepidlem Acralock SA1-15A a zajistí samořezným šroubem do plastu.

Na řezu bubnu (Obr. 17) je vidět barevné odlišení statické klece s magnety (červená barva) a rotační buben (modrá barva součástí). Podrobné sestavení bubnu ve výkresu podsestavy bubnu viz. Příloha 3.



Obr. 17 Řez bubnem

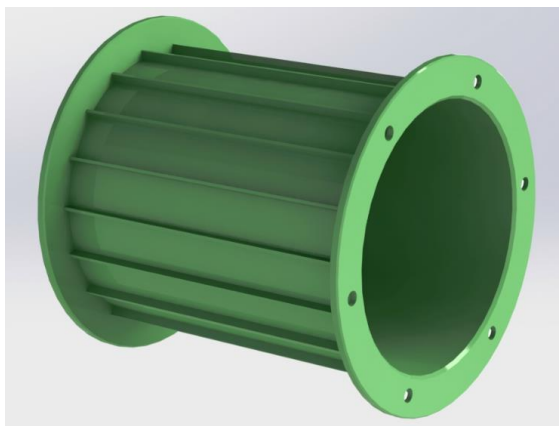
- | | |
|--|--|
| 1 – Vibrační násypka | 6 – Rám separátoru |
| 2 – Horní kryt bubnu | 7 – Spodní kryt bubnu s přírubami KF40 |
| 3 – Rotační část bubnu (modré součásti) | 8 – Domek gufera, ochrana proti prachu |
| 4 – Statická část bubnu (červené součásti) | 9 – Ložisko 6002-2RS (celkem 3 ks) |
| 5 – Neodymové magnety | 10 – Krokový motor 17HS4023 |

5.3.1 Magnety

Na základě úspěšného experimentu, ve kterém byly použity válcové neodymové magnety, jsem pro konečné řešení zvolil taktéž permanentní neodymové magnety. Pro zvýšení intenzity magnetického pole a dodržení maximální hustoty magnetických pólů, bude použito 50 kusů magnetů, které budou vsazeny do statické klece. Magnetické póly musí směřovat ven z plochy klece a musí být střídány pro vytvoření maximální intenzity magnetického pole, která je důležitá pro separaci malých částic prášku. Zvolené magnety mají rozměr 20x10x5 mm a váží 7,5 g.

5.3.2 Buben

Jedná se o rotující součást separátoru, proto je vhodné, aby byla co nejlehčí. Ideálním materiálem je taktéž plast, s ohledem na tvarovou náročnost (žebra – Obr. 18) je 3D tisk bubnu velice výhodný. Buben bude taktéž přicházet do styku s práškem, proto je nutná jeho povrchová úprava, aby na něm prášek neulpíval. Alternativním materiálem by byla nerezová ocel, ze které by byl buben svařen.



Obr. 18 Render bubnu

5.3.3 Uložení bubnu a statické klece

Pro dosažení minimálního odporu při rotaci bude buben uložen v kuličkových ložiscích. Z konstrukčních důvodů volím ložiska rozměrové řady 60, konkrétně ložisko 6002-2RS s oboustranným krytováním proti prachu, který by se do ložiska mohl dostat a znehodnotit jej.

Pro výpočet životnosti ložiska uvažuji takové zatížení, které je vyvolané celkovou hmotností bubnu, tedy situaci jsem značně zjednodušil a také značně předimenzoval zatížení ložiska, protože reálně ložisko bude zatíženo zhruba poloviční silou.

Výpočet životnosti ložisek

Hmotnost celého bubnu: $m = 0,8 \text{ kg}$

Otáčky bubnu: $n = 30 \text{ min}^{-1}$

Základní dynamická únosnost ložiska: $C = 5,85 \text{ kN}$

Axiální síla na ložisko: $F_x = 0 \text{ N}$

Radiální síla na ložisko: $F_y = m \cdot g = 0,8 \cdot 9,81 = 7,9 \text{ N}$

Životnost ložiska:
$$L_{10} = \frac{60 \cdot 10^6}{n} \cdot \left(\frac{C}{F_y} \right)^3 = \frac{60 \cdot 10^6}{30} \cdot \left(\frac{5850}{7,9} \right)^3 = 8,18 \cdot 10^{14} \text{ h} \quad [30]$$

I s předimenzovanými vstupy pro výpočet životnosti ložiska mohu usoudit, že ložiska vydrží po celou dobu životnosti separátoru. Ložiska by mohla být řádově menší, ale z konstrukčních důvodů volím právě tyto. Celá konstrukce je navržena tak, aby mohla být patřičně zvětšena bez nutnosti změny konstrukčního uspořádání. Proto jsem zvolil právě kuličková ložiska, která mohou být nahrazena za větší ve větším separátoru.

Celý buben bude poháněn krokovým elektromotorem. Buben je uložen ve třech ložiscích 6002-2RS. Uložení je vidět na Obr. 17. Obě krajní ložiska (zelená) slouží pro uložení rotačního bubnu s klecí a třetí ložisko (fialové) zajišťuje vzájemnou rotaci mezi bubnem a klecí s magnety. Celý buben bude mít tedy minimální odpor, přesněji:

Výpočet potřebného momentu motoru pro rozběh

Rozběhové momenty ložisek jsou počítány dle výpočtů SKF [31], zatížení ložisek uvažuji opět zjednodušené a značně předimenzované.

Odhadovaný čas uvedení bubnu do provozních otáček: $t = 0,1 \text{ s}$

Úhlová rychlost: $\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 30}{60} = 3,14 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$

Úhlové zrychlení: $\alpha = \frac{\omega}{t} = \frac{3,14}{0,1} = 31,4 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$

Moment setrvačnosti rotující části bubnu: $I_x = 6 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

Rozběhový moment ložiska 6002-2RS: $M_S = 10^{-5} \text{ Nm}$

Potřebný moment motoru pro rozběh:

$$M_{Start} = I_x \cdot \alpha + 3 \cdot M_S = 6 \cdot 10^{-4} \cdot 31,4 + 3 \cdot 10^{-5} = 0,019 \text{ Nm}$$

Výpočet potřebného momentu motoru pro rotaci bubnu

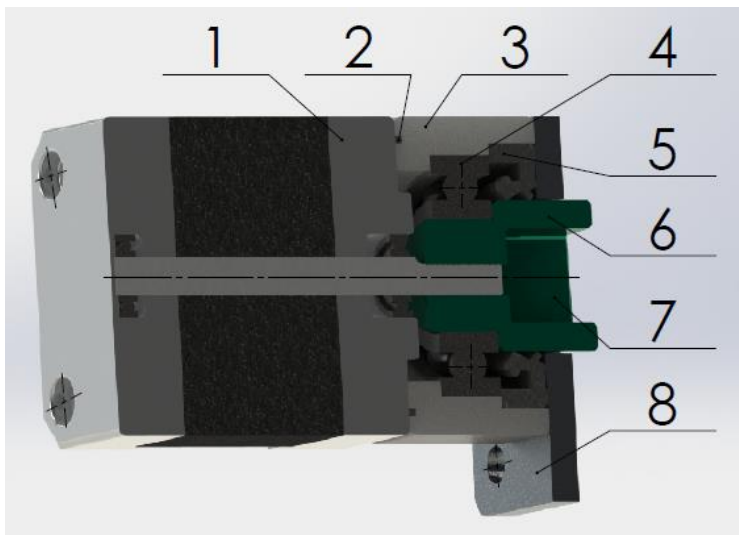
Proti hnacímu momentu motoru působí ztráty v ložiscích (výpočet dle SKF [31]) a síla na částice prášku vyvolaná magnetickým polem. Tuto sílu ve výpočtu zanedbám, nicméně volím silnější elektromotor. Dále proti vstupnímu krouticímu momentu působí ztrátové tření v guferech, které je při nízkých otáčkách taktéž zanedbatelné, jeho hodnota by musela být zjištěna experimentálně.

Ztrátový moment ložiska 6002-2RS: $M_Z = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ Nm}$

Potřebný moment motoru pro chod:

$$M_{Motoru} = 3 \cdot M_Z = 3 \cdot 1,4 \cdot 10^{-4} = 4,2 \cdot 10^{-4} \text{ Nm}$$

Pro pohon samotného bubnu je zapotřebí motor s kroutícím momentem minimálně 0,02 Nm. Jedná se o tak malý kroutící moment, že není nutné jej zohledňovat. Pro konstrukci jsem zvolil modelářský krokový motor s přírubou nema17, který jde jednoduše uchytit díky přírubě a má dostatečný výkon. Nejslabší varianta krokového motoru 17HS2408 má kroutící moment 0,12 Nm, který bude dostatečný pro pohon bubnu, na kterém bude feromagnetický prášek. Jelikož se jedná o krokový motor, jeho regulace bude taktéž jednoduše proveditelná, například pomocí některé z vývojových desek Arduino s použitím příslušného driveru.



Obr. 19 Řez pohonem

- 1 – Krokový motor 17HS2408 s přírubou nema17
- 2 – Těsnící O-kroužek
- 3 – Pouzdro pro uložení ložiska a gufera
- 4 – Ložisko 6002-2RS
- 5 – Gufero pro zamezení vstupu prachu
- 6 – Spojka
- 7 – Vnitřní čtyřhran ve spojce, pro jednoduchou montáž bubnu
- 8 – Deska připevněná k rámu

5.4 Krytování

Prášek se bude nasypávat, tudíž je zvýšené riziko výskytu částic v ovzduší. Aby se tomuto jevu co nejvíce zabránilo, všechna místa, kde se vyskytuje prášek, zejména kde dopadá, jsou krytována. I přes to se nejedná o prachotěsné krytování celého separátoru.

Krytování má členité tvary, proto jej bude nejjednodušší svařit z předem ohnutých kusů nerezových plechů o tloušťce 1-1,5 mm.

Montáž horního i spodního krytování musí probíhat současně, oba kryty jsou proti sobě staženy šrouby M4x30. Při čištění separátoru je nutné čistit veškeré krytování, proto tato vlastnost není nevýhodou.

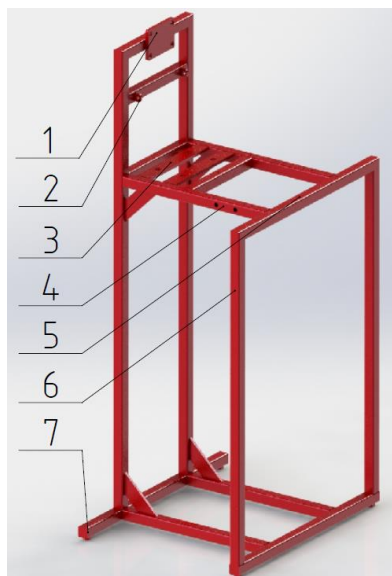
Spodní část krytování (pod bubnem) zároveň slouží jako násypka separovaného prášku do přenosných nádob. Konce násypky jsou opět opatřeny vhodnými přírubami pro lehkou montáž nádob.

Podrobný výkres umístění krytování na rámu viz. Příloha 2.

5.5 Rám

Celý nosný rám separátoru je svařen z tenkostěnných ocelových čtyřhranných profilů TR 4HR 15x15x1,5 ČSN EN 10219-2 vyrobených z materiálu S235JRH EN 10219-1.

Spodní část rámu je rozšířena pro maximální stabilitu celé konstrukce a pro případ potřeby jsou připraveny držáky pro závaží. Pokud by se, díky budiči vibrací na násypce, dostala celá konstrukce do rezonance, bude nutné na rám umístit vhodné závaží.



- 1 – Úchyt nátrubku s přírubou pro připojení zásobníku
- 2 – Úchyt vibrační násypky (připojení pomocí čepu)
- 3 – Připravené místo pro montáž závaží
- 4 – Montážní otvory pro pohon
- 5 – Montážní otvory pro krytování bubnu
- 6 – Samotný rám z profilů TR 4HR 15x15x1,5
- 7 – Matice M6 pro montáž stavěcích noh

Obr. 20 Render rámu

6 DISKUZE

V této práci jsem navrhl konstrukci laboratorního magnetického separátoru, který je určen pro separaci jemných prášků, které se využívají při aditivní SLM výrobě.

6.1 Identifikace parametrů

Na základě poznatků z rešerše jsem identifikoval podstatné parametry pro navržení zařízení. Pro separování jsem zvolil právě magnetickou separaci, která je vhodná pro separování feromagnetických a diamagnetických prášků, které mají velice podobné distribuce. Ze získaných poznatků také vyplynulo, že pro kvalitní separaci je velice podstatná vysoká hustota magnetických pólů na bubnu a velikost magnetické indukce není tolik podstatná.

6.2 Návrh dvou variant

Inspiroval jsem se průmyslovými magnetickými separátory, abych mohl zvolit dvě nejvhodnější varianty. Primárním kritériem pro výběr vhodných variant byla jednoduchá konstrukce, kterou bude možno jednoduše zakrytovat a v případě potřeby snadno rozebrat a vyčistit. Další podmínkou výběru byly pouze takové separátory, které disponují kontinuálním čištěním feromagnetického materiálu.

Zvolenými variantami jsou dopravníkový pás osazený magnetickým válcem namísto hnaného válce a magnetický buben.

6.3 Výběr zvolené varianty

S ohledem na jednoduchost konstrukce a její kompaktnost jsem se rozhodl pro detailnější zpracování druhé varianty, tedy magnetického bubnu. Díky kompaktnosti je snadné navrhnutí zakrytování částí, které jsou kontaminovány práškem.

Celý buben je uložen pouze v ložiscích, takže na pohon nejsou kladeny velké nároky, jako by tomu bylo u pohonu dopravníkového pásu. Pro samotný pohon bubnu je potřebný krouticí moment 0,02 Nm, nicméně při výpočtu nebyla zahrnuta síla, kterou vyvolá feromagnetický prášek v magnetickém poli na bubnu. Motor je uchycen pomocí normalizované příruby nema17 a z tohoto důvodu bude motor velice jednoduché vyměnit za jiný, silnější, pokud to bude provoz vyžadovat.

6.4 Prototyp bubnového separátoru

Schopnost zvolené varianty separovat jemný prášek jsem ověřil pomocí experimentálního zařízení, které bylo zkonstruováno z 3D vytištěných dílů a stavebnice Merkur. Při experimentu jsem separoval asi 20 g smíchaného železného a měděného prášku, který byl smíchán v poměru 1:1. Při optické analýze jsem zjistil mírné nedostatky při separaci železného prášku, zůstalo v něm zhruba 5 % měděných částic.

Domnívám se, že úpravou rychlosti rotace bubnu a rychlosti nasypávání prášku na buben bude tato separace mnohem efektivnější. Taktéž se jednalo o pouhý konstrukční návrh, na kterém jsem zjistil jeho nedostatky, které jsou ve zpracované variantě odstraněny.

I kdyby se nepodařilo separovat materiál na 100 %, jedná se o separátor využívaný v laboratorních podmínkách, proto nejsou kladeny požadavky na rychlost a bude možné separaci provést vícekrát pro dosažení požadované přesnosti separace.

Z analýzy jsem také zjistil, že měděný prášek byl kontaminován pouze stopovým množstvím železných částic.

6.5 Výkresová dokumentace

Pro separátor jsem zpracoval výkres sestavení BP-2019-01/00 a výkresy podsestav rámu a krytování BP-2019-01/01, bubnu BP-2019-01/02 a pohonu BP-2019-01/03, které jsou součástí přílohy.

6.6 Bezpečnost a možné pokračování

Při práci s práškem je nutno dodržovat národní bezpečnostní normu, která odpovídá kategorii zařazení prášku, případně pokyny udávané výrobcem. Manipulací s práškem se mohou do ovzduší dostat částice menší než 1 μ m, které mohou být vdechnuty. Proto je nezbytné využívat potřebné ochranné pomůcky, jako je dýchací polomaska, rukavice, ochranné brýle, antistatická obuv a další. Separátor je krytován ale není utěsněn prachotěsně, a proto by v jeho blízkosti mělo být umístěno zařízení, které je schopno detekovat podmikronové částice v ovzduší.

Separátor by měl být uzemněn, protože při vzniku statického výboje může dojít k explozi nebo vzplanutí prášku, který je smíchán se vzduchem.

Možnou úpravou by bylo celý separátor utěsnit vzduchotěsně, například jej umístit do vzduchotěsné krabice, ve které by bylo vákuum, případně inertní atmosféra. Toto by redukovalo riziko vznícení nebo exploze a také by bylo možné separovat materiály, které jsou prudce reaktivní se vzduchem (titan, hliník, ...).

7 ZÁVĚR

Hlavní cíl a také všechny dílčí cíle bakalářské práce byly splněny. Na trhu se nevyskytuje žádné komerční zařízení, které by bylo schopno separovat jemné prášky (s velikostí částic řádově 10-45 μm) využívané technologií SLM, proto bylo mým cílem v této práci navrhnout konstrukci magnetického separátoru, který to dokáže. Konstrukci jsem navrhl na základě poznatků z rešerše magnetických separátorů, které se využívají v průmyslu a sestaveného funkčního koncepčního zařízení. Jedná se o kompaktní separátor, který bude využíván v laboratorních podmínkách pro separaci smíchaného práškového materiálu, který byl využit pro 3D tisk technologií SLM. Separátor je určen pro separaci prášků magnetických a nemagnetických.

V experimentu jsem separoval 20 g smíchaného prášku a následně separované prášky opticky analyzoval pomocí mikroskopu VHX-6000. Z analýzy jsem zjistil, že prášek mědi byl kontaminován jen stopově železnými částicemi. V železném prášku se nacházelo zhruba 5 % částic mědi. Detailně navržený separátor má upraveny nedostatky z experimentální konstrukce. Následnou úpravou rychlosti separace půjde dosáhnout kvalitního výsledku. Případně železný prášek může být separován dvakrát pro dosažení minimální kontaminace.

Přínosem práce je samotný návrh konstrukce separátoru, který může být použit pro separaci použitého prášku po 3D tisku v laboratořích Ústavu konstruování VUT v Brně, ve kterých se vyvíjí vícemateriálový SLM 3D tisk.

Vhodným pokračováním by bylo sestavení separátoru dle výkresů sestavení a následné přidání bezpečnostních prvků. Například zakrytování separátoru vzduchotěsnou krabicí s možností vytvoření inertní atmosféry a také osazení snímačem podmikronových částic v ovzduší.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] X. C. Wang, T. Laoui, J. Bonse, J. P. Kruth, B. Lauwers, a L. Froyen, „Direct selective laser sintering of hard metal powders: Experimental study and simulation", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2002.
- [2] J. Sůkal, „Analýza vlivu recyklace práškové oceli na porozitu dílů vyráběných technologií Selective Laser Melting", Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2017.
- [3] S. L. Sing, L. P. Lam, D. Q. Zhang, Z. H. Liu, a C. K. Chua, „Interfacial characterization of SLM parts in multi-material processing: Intermetallic phase formation between AlSi10Mg and C18400 copper alloy", *Mater. Charact.*, 2015.
- [4] „ELCAN Industries". [Online]. Dostupné z: <https://elcanindustries.com/>. [Viděno: 08-bře-2019].
- [5] „Hi-Sifter". [Online]. Dostupné z: <https://elcanindustries.com/screening-technology/high-energy-screening-machines/?pgref=iron-powder>. [Viděno: 08-bře-2019].
- [6] „Hi-Sifter Powder Reclaiming System". [Online]. Dostupné z: <https://elcanindustries.com/hi-sifter-powder-reclaiming-system/?pgref=iron-powder>. [Viděno: 08-bře-2019].
- [7] „Rhewum". [Online]. Dostupné z: <https://elcanindustries.com/screening-technology/rectangular-screeners/?pgref=iron-powder>. [Viděno: 08-bře-2019].
- [8] „Kenutec". [Online]. Dostupné z: <https://www.kemutecusa.com/>. [Viděno: 12-bře-2019].
- [9] „SLM-Solutions Group AG". [Online]. Dostupné z: <https://slm-solutions.com/en/>. [Viděno: 27-úno-2019].
- [10] F. Tialv, „Material data sheet CuSn10". [Online]. Dostupné z: https://www.slm-solutions.com/fileadmin/user_upload/MDS_Cu-Alloy_CuSn10_CC480K_0519.pdf. [Viděno: 08-bře-2019].
- [11] F. Tialv, „Material data sheet Stainless Steel 1-4545". [Online]. Dostupné z: https://www.slm-solutions.com/fileadmin/user_upload/MDS_FE_Alloy_15_5PH_0219.pdf. [Viděno: 08-bře-2019].
- [12] Jie Chen; Yongqiang Yang; Changhui Song; Mingkang Zhang; Shibiao Wu; Di Wang, „Interfacial microstructure and mechanical properties of 316L /CuSn10 multi-material bimetallic structure fabricated by selective laser melting", *Mater. Sci. Eng. A*, roč. 752, s. 75–85, 2019.
- [13] K. a M. K. SKOTNICOVÁ, *Prášková metalurgie: studijní opory*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3378-1.
- [14] O. D. Neikov, S. S. Naboychenko, I. V. Murashova, V. G. Gopienko, I. V. Frishberg, a D. V. Lotsko, *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders - Technologies and Applications*. 2009.

- [15] H. Zhu, H. Tong, F. Yang, a C. Cheng, „Plasma-assisted preparation and characterization of spherical stainless steel powders", *J. Mater. Process. Technol.*, 2018.
- [16] J. P. K. B. Van der Schueren, „Powder deposition in selective metal powder sintering", *Rapid Prototyp. J.*, roč. 1, č. 3, s. 23–31, 1995.
- [17] „Sollau automatické separátory". [Online]. Dostupné z: <https://www.sollau.cz/katalog/cs-c11-automaticke.html>. [Viděno: 13-bře-2019].
- [18] „Magnet-PRO magnetické separátory". [Online]. Dostupné z: <http://www.magnet-pro.cz/magneticke-separatory>. [Viděno: 13-bře-2019].
- [19] „MaGsy magnetické separátory". [Online]. Dostupné z: <https://www.magsy.cz/24669-magneticke-separatory-odlucovace-kovu>. [Viděno: 13-bře-2019].
- [20] „Sollau magnetická deska". [Online]. Dostupné z: <https://www.sollau.cz/katalog/cs-i101-magneticka-deska-s-automaticym-cistenim-dnd-ac-eko.html>. [Viděno: 13-bře-2019].
- [21] „Sollau magnetický válec". [Online]. Dostupné z: <https://www.sollau.cz/katalog/cs-i11-magneticky-valec-mv.html>. [Viděno: 13-bře-2019].
- [22] „MaGsy magnetický válec". [Online]. Dostupné z: <https://www.magsy.cz/26245-magneticke-valce>. [Viděno: 13-bře-2019].
- [23] „Sollau magnetický buben". [Online]. Dostupné z: <https://www.sollau.cz/katalog/cs-i9-magneticky-buben-mb.html>. [Viděno: 13-bře-2019].
- [24] „MaGsy magnetický buben". [Online]. Dostupné z: <https://www.magsy.cz/24792-magneticke-bubny>. [Viděno: 13-bře-2019].
- [25] „Sollau laboratorní magnetický separátor". [Online]. Dostupné z: <https://www.sollau.cz/katalog/cs-i100-laboratorni-magneticky-separator-lsv.html>. [Viděno: 13-bře-2019].
- [26] „Elektromagnetický buben". [Online]. Dostupné z: <http://www.walkermagnet.com/separation-magnetic-drums-electromagnetic-drums.htm>. [Viděno: 16-bře-2019].
- [27] Jindřich Nesvadba, *Zařízení pro drcení a třídění odpadu: 2. část*, Inkoteka. Praha: Inkoteka, 1994.
- [28] „Magnetické vlastnosti neodymových magnetů". [Online]. Dostupné z: <https://e-shop.magsy.cz/magneticke-vlastnosti-neodymovych-magnetu-a105.htm>. [Viděno: 19-bře-2019].
- [29] „UniMagnet". [Online]. Dostupné z: <https://www.unimagnet.cz/>. [Viděno: 13-kvě-2019].
- [30] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE, Richard G. (Richard Gordon) BUDYNAS, Martin HARTL a Miloš VLK. *Konstruování strojních součástí*. V Brně: VUTIUM, 2010, xxv, 1159 s. : il. ; 26 cm. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [31] SKF, „Výpočet ztrát v ložiscích". [Online]. Dostupné z: <https://www.skf.com/cz/knowledge-centre/engineering-tools/skfbearingcalculator.html>. [Viděno: 06-kvě-2019].

- [32] „Prášky pro SLM". [Online]. Dostupné z: <https://www.visionqci.com/materials/>. [Viděno: 18-bře-2019].
- [33] „Magnetický separátor". [Online]. Dostupné z: <https://www.magsy.cz/24791-magnet-nad-dopravnik-magneticka-deska>. [Viděno: 14-kvě-2019].

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Zkratka	Význam
ABS	Akrylonitrilbutadiénstyren
FDM	Fused Deposition Modelling
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering

Symbol	Jednotka	Popis
α	$(rad \cdot s^{-2})$	úhlové zrychlení bubnu
ω	$(rad \cdot s^{-1})$	úhlová rychlost bubnu
C	(kN)	základní dynamická únosnost ložiska
F_x	(N)	radiální síla na ložisko
F_x	(N)	axiální síla na ložisko
g	$(m \cdot s^{-2})$	gravitační zrychlení
I_x	$(kg \cdot m^2)$	kvadratický moment setrvačnosti k ose rotace
L_{10}	(h)	časová únosnost ložiska
m	(kg)	váha bubnu
M_{Motoru}	(Nm)	moment potřebný pro rotaci bubnu
M_s	(Nm)	statický moment ložiska
M_{Start}	(Nm)	moment potřebný pro roztočení bubnu
M_z	(Nm)	ztrátový moment ložiska
n	(min^{-1})	otáčky bubnu
t	(s)	čas pro zrychlení bubnu

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1 Prášky pro SLM tisk [32]	13
Obr. 2 Sítový separátor Hi-Sifter Powder Reclaiming System [6]	15
Obr. 3 Deskový magnetický separátor s kontinuálním čištěním [33]	16
Obr. 4 Magnetická deska rovnoběžně s dopravníkem (vlevo); kolmo (vpravo) [17]	18
Obr. 5 Magnetický válec [18]	19
Obr. 6 Kombinace magnetické desky (1) a magnetického válce (2) [19]	19
Obr. 7 Magnetický buben pod dopravníkem [23] (vlevo), pod násypkou [24] (vpravo) ...	20
Obr. 8 Dvoupatrový magnetický buben [24]	20
Obr. 9 Laboratorní separátor firmy Sollau [25]	21
Obr. 10 Řešení s magnetickým válcem	26
Obr. 11 Řešení s magnetickým bubnem	28
Obr. 12 Prototyp bubnového separátoru	29
Obr. 13 Cu částice v železném prášku	29
Obr. 14 Sběrné nádoby po skončení experimentu; vlevo měď, vpravo železo	30
Obr. 15 Fe částice v měděném prášku	30
Obr. 16 Render konstrukce separátoru	31
Obr. 17 Řez bubnem	33
Obr. 18 Render bubnu	34
Obr. 19 Řez pohonem	36
Obr. 20 Render rámu	37

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Technologické vlastnosti ocelových a měděných prášků [15], [16]	17
--	----

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1:	Výkres sestavy: MAGNETICKÝ SEPARÁTOR	BP-2019-01/00
Příloha 2:	Výkres podsestavy: KRYTOVÁNÍ	BP-2019-01/01
Příloha 3:	Výkres podsestavy: BUBEN	BP-2019-01/02
Příloha 4:	Výkres podsestavy: POHON	BP-2019-01/03